

## (12) NACH DEM VERTRÄG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG



Rec'd PCT/PTO

14 MAR 2005

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

PCT

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
1. April 2004 (01.04.2004)(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2004/026673 A2**(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **B62D 65/00**[DE/DE]; Lilienweg 1, 71106 Magstadt (DE). **SCHRECK, Andreas** [DE/DE]; Dietinger Strasse 47, 89134 Blaustein (DE). **SCHULER, Bernd** [DE/DE]; Im Dellen 10, 72221 Hailerbach (DE). **STAHS, Thomas** [DE/DE]; Albecker Steige 114, 89081 Ulm (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2003/009922

(74) Anwälte: **NÄRGER, Ulrike** usw.; DaimlerChrysler AG, Intellectual Property Management, IPM-C106, 70546 Stuttgart (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:

6. September 2003 (06.09.2003)

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): JP, US.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

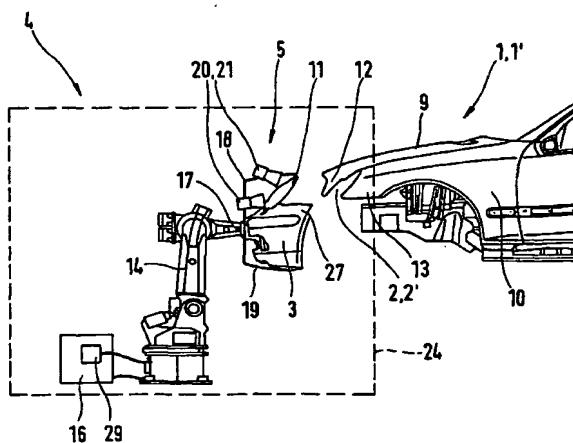
**Veröffentlicht:**(30) Angaben zur Priorität:  
102 42 710.0 13. September 2002 (13.09.2002) DE

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US*): DAIMLERCHRYSLER AG [DE/DE]; Epplestrasse 225, 70567 Stuttgart (DE).*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*(72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): BECKER, Frauke

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR THE POSITIONALLY PRECISE MOUNTING OF AN ADD-ON PART ON A VEHICLE BODY

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR LAGEGENAUEN MONTAGE EINES ANBAUTEILS AN EINE FAHRZEUGKAROSSE



**(57) Abstract:** The invention relates to a method for mounting an add-on part (3) on a production part (1), particularly on a vehicle body during which the add-on part (3) should be aligned in a positionally precise manner with regard to a reference area (12, 13) on the workpiece (1). To this end, a robot-guided mounting tool (5) is used that is connected to a sensor system (20) in a fixed manner. In order to achieve a positionally precise alignment of the add-on part (3), an iterative control method is run through, over the course of which an (actual) measured value of the sensor system (20) is firstly generated that is compared with a (set) measured value generated within the scope of a setting-up phase. A displacement vector of the mounting tool (5) is calculated based on the difference between the (actual) measured value and the (set) measured value while using a Jacobian matrix that is calculated within the scope of the setting-up phase, and the mounting tool (5), along with the add-on part (3) fixed therein, is iteratively displaced by these displacement vectors relative to the production part (1) until the desired position is attained. A metric calibration of the sensor system (20) can be forgone in order to perform this positioning task.

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]***WO 2004/026673 A2**



Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

---

**(57) Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Montage eines Anbauteils (3) an ein Werkstück (1), insbesondere an eine Fahrzeugkarosserie, wobei das Anbauteil (3) lagegenau gegenüber einem Referenzbereich (12,13) auf dem Werkstück (1) ausgerichtet werden soll. Hierzu wird ein robotergeführtes Montagewerkzeug (5) verwendet, welches fest mit einem Sensorsystem (20) verbunden ist. Um die lagegenaue Ausrichtung des Anbauteils (3) zu erreichen, wird ein iterativer Regelsvorgang durchlaufen, im Zuge dessen zunächst ein (Ist-)Messwert des Sensorsystems (20) erzeugt wird, welcher mit einem im Rahmen einer Einrichphase erzeugten (Soll-)Messwert verglichen wird. Aus der Differenz zwischen (Ist-)Messwert und (Soll-) Messwert werden unter Verwendung einer im Rahmen der Einrichphase berechneten Jacobi-Matrix ein Verschiebungsvektor des Montagewerkzeugs (5) berechnet, und das Montagewerkzeug (5) mit dem darin fixierten Anbauteil (3) wird iterativ um diese Verschiebungsvektoren gegenüber dem Werkstück (1) verschoben, bis die gewünschte Lage erreicht ist. Zur Lösung dieser Positionieraufgabe kann auf eine metrische Kalibrierung des Sensorsystems (20) verzichtet werden.

Verfahren und Vorrichtung  
zur lagegenauen Montage eines Anbauteils  
an eine Fahrzeugkarosserie

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Montage eines Anbauteils an ein Werkstück, insbesondere an eine Fahrzeugkarosserie, bei dem das Anbauteil lagegenau gegenüber einem Referenzbereich auf dem Werkstück montiert wird, nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, wie es beispielsweise aus der EP 470 939 A1 als bekannt hervorgeht. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Montagesystem zur Durchführung dieses Verfahrens.

An Fahrzeugkarosserien werden im Zuge der Montage an unterschiedlichen Stellen im Außen- und im Innenbereich Anbauteile (z.B. Heckmodul, Frontmodul, Dachmodul, Cockpit, ...) angebaut. Im Interesse einer qualitativ hochwertigen Anmutung der Karosserie ist es notwendig, diese Anbauteile hochgenau gegenüber benachbarten Bereichen auf der Karosserie bzw. gegenüber anderen (benachbarten) An- und Einbauteilen auszurichten und so zu positionieren, dass vorgegebene (Spalt-)Übergangsmaße zwischen dem Anbauteil und den angrenzenden Karosseriebereichen gewährleistet ist. Hierzu muss das Anbauteil lagegenau gegenüber der Karosserie ausgerichtet und in diesem Zustand mit Hilfe eines Fügeverfahrens - beispielsweise durch Anschrauben, Punktschweißen oder Kleben - an der Karosserie befestigt werden.

So muss beispielsweise das Frontmodul in einer solchen Weise in die (Rest-)Karosserie eingepasst werden, dass zwischen dem Frontmodul und der Motorhaube bzw. zwischen Frontmodul und den Kotflügeln möglichst gleichmäßige Spaltmaße und Übergänge erreicht werden. Um eine solche hochgenaue Ausrichtung des

Frontmoduls gegenüber den benachbarten Karosseriebereichen sicherzustellen, muss das Frontmodul zunächst lagegenau gegenüber den Nachbarbereichen der Karosserie ausgerichtet werden und anschließend in diesem Zustand mit der Karosserie verbunden werden.

In der EP 470 939 A1 wird ein Montageverfahren vorgeschlagen, mit Hilfe dessen eine lagegenaue Ausrichtung und Befestigung eines Anbauteils - insbesondere einer Fahrzeugtür - in einem Türausschnitt einer Fahrzeugkarosserie erreicht werden soll. Hierbei kommt ein robotergeführtes Montagewerkzeug zum Einsatz, das das Anbauteil aus einem Werkstückträger entnimmt und in den Türausschnitt einsetzt. Bei diesem Verfahren wird das Montagewerkzeug zunächst - ohne Anbauteil - in eine (raumfeste) Referenzposition gegenüber dem Türausschnitt bewegt; in dieser Referenzposition werden mit Hilfe von Kameras, die fest mit dem Montagewerkzeug verbunden sind, Bilder des Umgebungsbereichs des Türausschnitts aufgenommen, aus denen die Position des Türausschnitts relativ zur Referenzposition des Montagewerkzeugs berechnet wird. Anschließend entnimmt das Montagewerkzeug ein Anbauteil aus dem Werkstückträger. Dann wird das Montagewerkzeug - diesmal mit Anbauteil - wieder in die Referenzposition bewegt; in dieser Referenzposition wird mit Hilfe der auf dem Montagewerkzeug montierten Kameras ein weiterer (zweiter) Satz von Bildern aufgenommen, aus denen die Position des im Montagewerkzeug gehaltenen Anbauteils berechnet wird. Durch einen Vergleich der beiden Bilddatensätze wird ein Verschiebungsvektor ermittelt, um den das Montagewerkzeug verschoben wird, um einen Versatz zwischen den Raumlagen des Türausschnitts und des Anbauteils zu kompensieren und so das Anbauteil gegenüber dem Türausschnitt auszurichten. In dieser korrigierten Raumlage wird das Anbauteil (unter Verwendung von Schweißrobotern) mit der Karosserie verbunden.

Das aus der EP 470 939 A1 bekannte Verfahren geht aus von zwei Bilddatensätzen des Türausschnitts bzw. des Anbauteils,

die beide in einer (raumfesten) Referenzposition des Montagewerkzeugs aufgenommen werden. Das Verfahren basiert somit auf einer Erfassung der Absolutlagen der Karosserie und des Anbauteils relativ zu der Referenzposition im Arbeitsraum des Roboters, an dessen Arm das Montagewerkzeug befestigt ist. Zur erfolgreichen Anwendung dieses Verfahrens müssen mehrere Randbedingungen erfüllt sein:

- Zunächst muss jede für die Positionsbestimmung zum Einsatz kommende Kamera in der Lage sein, einzelne Messwerte metrisch in bezug auf ihr internes Bezugskoordinatensystem zu bestimmen („interne metrische Kalibrierung der Kameras“).
- Weiterhin muss die Lage der Kameras im Arbeitsraum des Roboters bekannt sein („externe metrische Kalibrierung der Kameras“).
- Schließlich müssen die Einzelmessungen der Kameras auf eine solche Weise kombiniert und verdichtet werden, dass die genaue Absolutlage des Karosserieausschnitts bzw. des Anbauteils in bezug auf den Arbeitsraum des Roboters konsistent und prozesssicher berechnet werden kann.

Zur Kalibrierung der Sensoren ist in der EP 407 939 A1 eine nicht näher beschriebene Kalibriervorrichtung vorgesehen, die in jedem Zyklus des Roboters angefahren werden muss. Erfahrungsgemäß ist dabei der für die Erfüllung der obengenannten Randbedingungen notwendige Einricht- und Kalibreraufwand der Kameras und des Gesamtsystems sehr hoch und nur von Experten zu leisten. Außerdem ist eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte nur durch hochwertige (und daher teuere) Sensoren zu leisten.

Eine weitere Problematik des in der EP 470 939 A1 vorgeschlagenen Verfahrens besteht darin, dass die Bilddatengewinnung des Karosserieausschnitts einerseits und des Anbauteils andererseits in unterschiedlichen, zeitlich versetzten Prozessschritten erfolgen. Auch geringfügige Bewegungen der Karosserie während des Positionierungsvorgangs führen daher zu Fehlern und müssen ausgeschlossen werden.

Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur lagegenauen Montage eines Anbauteils an ein Werkstück, insbesondere an eine Fahrzeugkarosserie, vorzuschlagen, das mit einem wesentlich reduzierten Kalibrieraufwand verbunden ist und das – auch bei Verwendung kostengünstiger Sensoren – eine Steigerung der Genauigkeit gegenüber bekannten Verfahren gestattet. Der Erfindung liegt weiterhin die Aufgabe zugrunde, eine zur Durchführung des Verfahrens geeignetes Montagesystem vorzuschlagen.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale der Ansprüche 1 und 6 gelöst.

Zur Positionierung und Befestigung des Anbauteils an der Karosserie kommt ein mittels eines Roboters geführtes Montagewerkzeug zum Einsatz, das eine Fixiervorrichtung zur Aufnahme des Anbauteils und ein fest mit dem Montagewerkzeug verbundenes Sensorsystem umfasst. Die Fixiervorrichtung des Montagewerkzeugs wird mit einem Anbauteil bestückt und zunächst robotergesteuert in eine (fest einprogrammierte, von der aktuellen Lage der Karosserie im Arbeitsraum des Roboters unabhängige) sogenannte „Näherungsposition“ gegenüber der Karosserie gebracht. Ausgehend von dieser Näherungsposition wird ein Regelprozess durchlaufen, im Zuge dessen das Montagewerkzeug in eine sogenannte „Montageposition“ bewegt wird, in der das in der Fixiervorrichtung gehaltene Anbauteil lagegenau in der gewünschten Einbaulage gegenüber der Karosserie ausgerichtet ist. Im Zuge des Regelprozesses werden vom Sensorsystem (Ist-) Messwerte ausgewählter Referenzbereiche auf der Karosserie und auf dem Anbauteil erzeugt; diese (Ist-) Messwerte werden mit (Soll-) Messwerten verglichen, die in einer vorausgehenden Einrichphase erzeugt wurden. Anschließend wird das Montagewerkzeug um einen Verschiebungsvektor (umfassend Linearverschiebungen und/oder Drehungen) verschoben, der unter Zuhilfenahme einer sogenannten „Jacobi-matrix“ (oder „Sensitivitätsmatrix“) aus einer Differenz zwischen den (Ist-) und (Soll-) Messwerten berechnet wird. So-

wohl die (Soll-) Messwerte als auch die Jacobimatrix werden im Rahmen einer - dem eigentlichen Positionier- und Montagevorgang vorgesetzten - Einrichtphase ermittelt, im Rahmen derer das Montagewerkzeug auf die konkrete Montageaufgabe (d.h. eine konkrete Kombination aus Montagewerkzeug, Sensorsystem, Karosserietyp und Art und Einbauposition des einzusetzenden Anbauteils) eingelernt wird. Dieses Einrichtverfahren ist besonders vorteilhaft, da es allein durch „Zeigen“ einer Soll-Position von angelerntem Personal durchgeführt werden kann.

Ist der oben beschriebene Regelvorgang abgeschlossen und befindet sich das im Montagewerkzeug gehaltene Anbauteil somit in der gewünschten Montageposition gegenüber der Karosserie, so wird das Anbauteil in dieser Lage und Ausrichtung an die Karosserie montiert. Hierbei wird beispielsweise mit Hilfe robotergeführter Schraubwerkzeuge das Anbauteil mit der Karosserie verschraubt. Anschließend wird die Fixievorrichtung des Montagewerkzeugs gelöst, und das Montagewerkzeug wird in eine Rückzugsposition bewegt, in der die Karosserie kollisionsfrei aus dem Arbeitsbereich des Roboters entfernt und eine neue Karosserie zugeführt werden kann.

Der in einer Regelschleife durchlaufene Positionierungsvorgang, im Rahmen dessen das im Montagewerkzeug gehaltene Anbauteil von der (robotergesteuert angefahrenen) Näherungsposition in die (lagegenau zur Karosserie ausgerichtete) Montageposition gebracht wird, unterscheidet sich grundlegend von dem aus der EP 470 939 A1 bekannten Positionierungsvorgang: Im Verfahren der EP 470 939 A1 wird nämlich im Zuge der Positionierung zunächst die Absolutposition der Karosserie (bzw. des Karosserieausschnitts) im Arbeitsraum des Roboters ermittelt, die dann die Basis für die Ausrichtung des bestückten Montagewerkzeugs bildet. Im Unterschied dazu beruht das erfindungsgemäße Verfahren auf Relativmessungen, im Rahmen derer eine (in der Einrichtphase hinterlegte) Lage-Information - ent-

sprechend einem Satz von (Soll-) Messwerten des Sensorsystems - über den Regelvorgang wiederhergestellt wird.

Dies führt zu zwei wesentlichen Vereinfachungen gegenüber dem Stand der Technik:

- Zum einen ist keine interne metrische Kalibrierung der Sensoren mehr notwendig, da die zum Einsatz kommenden Sensoren nicht mehr „messen“, sondern lediglich auf eine monotone Inkrementalbewegung des Roboters mit einer monotonen Änderung ihres Sensorsignals reagieren. Dies bedeutet beispielsweise, dass bei Verwendung einer Fernseh- bzw. CCD-Kamera als Sensor die kamerainternen Linsenverzeichnungen nicht kompensiert werden müssen bzw. dass bei Verwendung eines Triangulationssensors die exakte metrische Berechnung von Abstandswerten entfällt.
- Weiterhin ist keine externe metrische Kalibrierung der Sensoren mehr notwendig: Im Unterschied zum Stand der Technik muss die Lage der Sensoren nicht mehr metrisch in Bezug auf den Arbeitsraum des Roboters bzw. das Koordinatensystem der Roboterhand ermittelt werden, um geeignete Korrekturbewegungen berechnen zu können. Die Sensoren müssen lediglich in einer solchen Weise am Montagewerkzeug befestigt werden, dass sie in ihrem Fangbereich überhaupt geeignete Messdaten der Referenzbereiche auf der Karosserie und des Anbauteils erfassen können.

Auf die in der Regel nur mit großem Aufwand zu ermittelnde metrische Messfunktion und die in der EP 470 939 A1 gezeigte Kalibriervorrichtung kann somit bei Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens vollständig verzichtet werden. Daher können metrisch unkalibrierte Sensoren zum Einsatz kommen, die wesentlich einfacher und somit auch billiger sind als kalibrierte Sensoren. Sowohl der instrumentelle Aufbau als auch die Einrichtung und der Betrieb des Gesamtsystems ist daher bei Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens sehr kostengünstig realisierbar. Weiterhin wird bei Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens die Ersteinrichtung und Wartung

des Montagesystems drastisch vereinfacht und kann auch von angelerntem Personal vorgenommen werden.

Das Ergebnis der Positionierung des Anbauteils gegenüber der Karosserie ist weiterhin unabhängig von der absoluten Positioniergenauigkeit des verwendeten Roboters, da eventuelle Roboterungenauigkeiten bei der Anfahrt der Montageposition ausgeregelt werden. Aufgrund der daraus resultierenden kurzen Fehlerketten ist bei Bedarf eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit im Positionierergebnis erzielbar.

Die Anzahl der Positionsfreiheitsgrade, die mit dem erfundungsgemäßen Verfahren in der Positionierphase kompensiert werden können, ist frei wählbar und hängt nur von der Konfiguration des Sensorsystems ab. Ebenso ist die Anzahl der verwendeten Sensoren frei wählbar. Die Anzahl der bereitgestellten (skalaren) Sensorinformationen muss lediglich gleich oder größer der Anzahl der zu regelnden Freiheitsgrade sein. Insbesondere kann eine größere Zahl von Sensoren vorgesehen werden, und die redundante Sensorinformation kann verwendet werden, z.B. um Formfehler des betrachteten Karosseriebereichs und/oder des einzupassenden Anbauteils besser erfassen zu können oder den Positionierungsvorgang in seiner Genauigkeit zu verbessern. Schließlich kann Sensorinformation aus unterschiedlichen berührungsfreien und/oder taktilen Quellen verwendet werden (z.B. eine Kombination von CCD-Kameras, optischen Spaltsensoren und taktilen Abstandssensoren). Somit können durch Verwendung geeigneter Sensoren die Messergebnisse unterschiedlicher qualitätsrelevanter Größen (z.B. Spaltmaße, Übergangsmaße, Tiefenmaße) beim Einpassprozess des Anbauteils berücksichtigt werden. Bei Montageaufgaben an Fahrzeugkarosserien können mit besonderem Vorteil berührungs-freie, im UV-Spektralbereich messende (z.B. Spalt-) Sensoren verwendet werden, die sich durch eine hohe Unempfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften auszeichnen und daher zur Erfassung geometrischer Merkmale auf transparenten Oberflächen und auf lackierten oder unlackier-

ten Fahrzeugkarosserien besonders geeignet sind. Solche Sensoren sowie das zugrundeliegende Messprinzip ist beispielsweise in der deutschen Patentanmeldung 103 36 666.0 beschrieben.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann sehr leicht auf neue Problemstellungen adaptiert werden, da lediglich die Sensor-datengewinnung und -aufbereitung, nicht aber der regelnde Systemkern adaptiert werden muss. Auf eine Nutzung von Modellwissen über die Karosserie und das einzufügende Anbauteil kann während des Positionierungsvorgangs verzichtet werden.

Im Vergleich zu dem Verfahren der EP 470 939 A1 gestattet die Erfindung einen wesentlich schnelleren Ausgleich von Restunsicherheiten, die bei der Positionierung des Anbauteils gegenüber dem Karosserieausschnitt auftreten können; solche Restunsicherheiten können zustande kommen durch fördertechnisch bedingte Lagefehler der Karosserie im Arbeitsbereich des Roboters, durch Lageabweichungen des Anbauteils im Montagewerkzeug und/oder durch Formfehler des einzufügenden Anbauteils bzw. der Karosserie, welche durch Bauteiltoleranzen und Toleranzen im Modulaufbau bedingt sind. Weiterhin werden Fehler des Roboters (z.B. Veränderungen aufgrund von Temperaturschwankungen oder -unterschieden) kompensiert.

Aufgrund dieser schnellen Positionsregelung des Montagewerkzeugs gegenüber der Karosserie braucht die Karosserie während des Positionierungsvorgangs nicht stationär aufgespannt sein, sondern sie kann (beispielsweise auf einem Montageband oder einer anderen geeigneten Fördertechnik) gegenüber dem Roboter bewegt werden. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität des erfindungsgemäßen Verfahrens, das somit auf unterschiedlichste Anwendungsfälle der Montage von Anbauteilen an stationären und bewegten Werkstücken anwendbar ist.

Das geregelte Anfahren der Montageposition kann in einer einzigen Regelschleife erfolgen; vorteilhafterweise wird dabei

jedoch ein iteratives Verfahren eingesetzt, bei dem Schwellwerte als Abbruchkriterien vorgegeben werden: So wird der Iterationsvorgang abgebrochen, wenn die Abweichung zwischen dem eingelernten (Soll-)Messwert und dem aktuellen (Ist-)Messwert unterhalb eines vorgegebenen Schwellwerts liegt; weiterhin wird der Iterationsvorgang abgebrochen, wenn die bei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten zu erreichende Reduktion der Abweichung zwischen (Soll-)Messwert und (Ist-)Messwert unterhalb eines weiteren vorgegebenen Schwellwerts liegt.

Das durch den Regelprozess in der Montageposition ausgerichtete Anbauteil kann - wie oben beschrieben - durch Verschrauben, Punktschweißen etc. direkt mit der Karosserie verbunden werden. Alternativ kann jedoch ein Fügeverfahren verwendet werden, bei dem das in der Montageposition ausgerichtete Anbauteil vor der eigentlichen Befestigung an der Karosserie kurzfristig aus der Montageposition entfernt werden muss, um beispielsweise eine Klebstoffraupe auf einen Verbindungsbe reich des Karosserieausschnitts und/oder des Anbauteils aufzubringen. In diesem Fall umfasst das Montageverfahren vor teilhafterweise die folgenden Prozessschritte:

- A Das Montagewerkzeug wird mit einem einzubauenden Anbauteil bestückt und wird - entsprechend des oben beschriebenen iterativen Regelvorgangs - von der (gesteuert angefahrenen) Näherungsposition in die Montageposition gegenüber der Karosserie bewegt, in der das Anbauteil lang genau gegenüber dem Karosserieausschnitt ausgerichtet ist;
- B das Montagewerkzeug wird robotergesteuert aus der Montageposition um einen fest vorgegebenen Versatz in eine Ausweichposition verschoben, um im Montagebereich Platz für ein robotergeführtes Hilfswerkzeug, beispielsweise einen Kleberoboter, zu schaffen;
- C das Hilfswerkzeug wird in den Montagebereich hineinbewegt, bearbeitet dort den Karosserieausschnitt und/oder das Anbauteil (indem er beispielsweise auf den Karosse-

rieausschnitt eine Klebstofffraupe aufbringt) und wird anschließend aus dem Montagebereich herausbewegt;

D das Montagewerkzeug wird robotergesteuert um den fest vorgegebenen Versatz aus der Ausweichposition zurück in die Montageposition verschoben (und das im Montagewerkzeug gehaltene Anbauteil somit wieder lagegenau im Montagebereich positioniert);

E das Anbauteil wird ggf. mit Hilfe eines weiteren Hilfswerkzeugs am Karosseriebereich befestigt (oder - im Falle einer Klebeverbindung - in der Montageposition gehalten, bis ein erstes Vernetzen des Klebers erfolgt ist);

F die Fixiervorrichtung des Montagewerkzeugs gelöst, und das Montagewerkzeug wird in die Rückzugsposition bewegt.

Der Prozessschritt B entspricht hierbei einer „Auslagerung“ des Anbauteils, welcher in Prozessschritt D rückgängig gemacht wird. Wesentlich dabei ist die Tatsache, dass die Prozessschritte B, D und E robotergesteuert als Relativbewegungen zu der in Prozessschritt A aufgefundenen Montageposition durchgeführt werden, so dass die im Regelvorgang des Prozessschritts A aufgefondene Montageposition als Referenzlage für die an diesen Prozessschritten beteiligten weiteren Hilfswerkzeuge verwendet werden kann. In Prozessschritt E des Montageverfahrens kann vorteilhafterweise eine zusätzliche Ausregelung der Zielposition des Anbauteils erfolgen, um Ungenauigkeiten des Prozessschritts zu eliminieren.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind den Unteransprüchen zu entnehmen. Im folgenden wird die Erfindung anhand eines in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert; dabei zeigen:

Fig. 1 eine schematische Frontalansicht eines Frontbereichs einer Fahrzeugkarosserie;

Fig. 2 eine schematische Seitenansicht eines Frontauschnitts einer Fahrzeugkarosserie und eines robotergeführten Montagewerkzeugs mit einem Frontmodul;

Fig. 3 eine schematische Aufsicht auf die Karosserie und das Montagewerkzeug der Figur 2;

Fig. 4 eine schematische Darstellung der Verfahrbahn des Montagewerkzeugs bei der Abarbeitung der Frontmodul-Montage der Figuren 1 bis 3;

Fig. 5 eine schematische Schnittansicht eines Dachbereichs einer Fahrzeugkarosserie während der Dachmodulmontage

Fig. 5a ... mit Dachmodul in Montageposition und

Fig. 5b ... mit Dachmodul in Ausweichposition.

Figur 1 zeigt eine Frontalansicht eines Fahrzeugs 8 mit einem Frontmodul 3 als Beispiel eines Anbauteils, das im Rahmen der Fahrzeugmontage an ein Werkstück, nämlich eine Rohkarosserie 1 angeschraubt wird. Figur 2a zeigt den Frontbereich dieser Rohkarosserie 1 mit einem Frontausschnitt 2, in den das Frontmodul 3 eingebaut wird, in einer Seitenansicht. Die Karosserie 1 umfasst eine Motorhaube 9 und Kotflügel 10, während ein Scheinwerfermodul 11 Teil des Frontmoduls 3 bildet.

Um einen qualitativ hochwertigen optischen Eindruck des fertigen Fahrzeugs 8 sicherzustellen, muss das Frontmodul 3 lagegenau (in bezug auf Position und Winkellage) gegenüber den dem Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 benachbarten Bereichen 12,13 auf der Motorhaube 9 und den Kotflügeln 10 montiert werden; insbesondere muss ein zwischen Frontmodul 3, Motorhaube 9 und Kotflügeln 10 vorliegender Spalt 15 (in Figur 1 gestrichelt gezeichnet) ein vorgegebenes, bestimmten Anforderungen entsprechendes Maß aufweisen. Die Umgebungsbereiche 12,13,9 bilden dabei einen sogenannten Referenzbereich zur Ausrichtung des Frontmoduls 3 gegenüber der Karosserie 1.

Die Montage des Frontmoduls 3 in die Karosserie 1 erfolgt mit Hilfe eines von einem Industrieroboter 14 geführten Montagewerkzeugs 5, das das Frontmodul 3 zuführt und lagegenau gegenüber dem Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 positioniert. Zur Lage- und Bewegungssteuerung des Roboters 14 und des Montagewerkzeugs 5 ist ein Steuersystem 16 vorgesehen.

Das Montagewerkzeug 5 ist an der Hand 17 des Industrieroboters 14 befestigt und umfasst einen Rahmen 18, an dem eine Fixiervorrichtung 19 befestigt ist, mit Hilfe derer das Frontmodul 3 aufgenommen werden kann. Die Fixiervorrichtung 19 ist vorteilhafterweise dreh- und/oder schwenkbar gegenüber dem Rahmen 18 des Montagewerkzeugs 5 angeordnet, so dass sie das Frontmodul 3 nach Abschluss der Montage leicht freigeben kann und aus dem Montagebereich entfernt werden kann.

Zur Vermessung der Lage und Ausrichtung des im Montagewerkzeug 5 fixierten Frontmoduls 3 gegenüber der Karosserie 1 ist das Montagewerkzeug 5 mit einem Sensorsystem 20 mit mehreren (in der schematischen Darstellung der Figur 2 zwei) Sensoren 21 versehen, die starr mit dem Rahmen 18 des Montagewerkzeugs 5 verbunden sind; sie bilden somit mit dem Montagewerkzeug 5 eine bauliche Einheit. Diese Sensoren 21 dienen zur Ermittlung von Spalt- und/oder Übergangsmaßen zwischen Randbereichen 22 des Frontmoduls 3 und den Nachbarbereichen 12,13 auf Motorhaube 9 und Kotflügeln 10 der Karosserie 1. Mit Hilfe dieses Sensorsystems 20 wird - wie weiter unten beschrieben - das in dem Montagewerkzeug 5 gehaltene Frontmodul 3 in einem iterativen Regelvorgang gegenüber dem Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 ausgerichtet.

Soll das Montagesystem 5 auf eine neue Bearbeitungsaufgabe - beispielsweise auf die Frontmodulmontage in einem neuen Fahrzeugtyp - eingestellt werden, so muss zunächst eine sogenannte Einrichtphase durchlaufen werden, in der das Montagewerkzeug 5 konfiguriert wird. Dabei wird eine dem zu montierenden Frontmodul 3 angepasste Fixiervorrichtung 19, ein geeignet gestalteter Rahmen 18 und ein Sensorsystem 20 mit entsprechenden Sensoren 21 ausgewählt und zusammengebaut. Im Anschluss daran wird das Sensorsystem 20 des Montagewerkzeugs 5 „eingelernt“, indem - wie im folgenden unter I. beschrieben - (Soll-) Messwerte des Sensorsystems 20 auf einer „Master“-Karosserie 1' und einem „Master“-Frontmodul 3' aufgenommen

werden und die gesteuert zu durchlaufenden Bahnabschnitte einer Verfahrbahn 23 des Roboters 14 einprogrammiert werden. Nach Beendigung dieser Einrichphase steht das so konfigurierte und eingemessene Montagesystem 4 nun zum Serieneinsatz bereit, bei dem für jede einem Arbeitsraum 24 des Roboters 14 zugeführte Karosserie 1 eine sogenannte Arbeitsphase durchlaufen wird, bei der - wie im folgenden unter II. beschrieben - ein zugehöriges Frontmodul 3 im Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 positioniert und befestigt wird.

#### I. Einrichphase des Montagewerkzeugs 5:

Zur Lösung einer neu gestellten Montageaufgabe wird in einem ersten Schritt zunächst ein der Montageaufgabe angepasstes Sensorsystem 20 für das Montagewerkzeug 5 ausgewählt und gemeinsam mit der Fixiervorrichtung 19 am Rahmen 18 befestigt. Das so zusammengebaute Montagewerkzeug 5 wird an der Roboterhand 17 befestigt. Die Fixiervorrichtung 19 wird dann mit einem („Master“-) Frontmodul 3' bestückt und (manuell bzw. interaktiv) in einer solchen Weise gegenüber einer („Master“-) Karosserie 1' im Arbeitsraum 24 des Roboters 14 ausgerichtet, dass eine „optimale“ Ausrichtung des („Master“-) Frontmoduls 3' gegenüber der („Master“-) Karosserie 1' gegeben ist; diese Relativlage des („Master“-) Frontmoduls 3' gegenüber der („Master“-) Karosserie 1' ist in Figur 2b dargestellt. Eine solche „optimale“ Ausrichtung kann beispielsweise dadurch definiert sein, dass der Spalt 15 zwischen dem („Master“-) Frontmodul 3' und der („Master“-) Karosserie 1' möglichst gleichförmig ist (siehe Figur 1), oder dass der Spalt 15 in bestimmten Regionen bestimmte Werte einnimmt. Die dabei eingenommene Relativposition des Montagewerkzeugs 5 gegenüber der („Master“-) Karosserie 1' wird im folgenden als „Montageposition“ 25 bezeichnet.

Die Zahl und die Lage der Sensoren 21 auf dem Rahmen 18 ist so gewählt, dass die Sensoren 21 auf geeignete, für die „op-

timale" Ausrichtung besonders wichtige, Bereiche 12,13 auf der („Master“-) Karosserie 1' bzw. Bereiche 22 des („Master“-) Frontmoduls 3' gerichtet sind. Im Ausführungsbeispiel der Figur 2a sind symbolisch zwei Sensoren 21 gezeigt von denen einer auf den Spalt 15 zwischen dem oberen Randbereich 26 des Scheinwerfermoduls 11 und dem in Zusammenbaulage angrenzenden Bereich 12 der Motorhaube 9 gerichtet ist, während der andere eine Spaltmessung zwischen dem Seitenbereich 27 des Frontmoduls 3 und dem Vorderbereich 13 des Kotflügels 10 (oder zwischen Scheinwerfer 28 und Kotflügeln 10) durchführt. Die Zahl der Einzelsensoren 21 sowie die Umgebungen 12,13,26,27, auf die sie ausgerichtet sind, werden in einer solchen Weise ausgewählt, dass sie eine bestmögliche Charakterisierung der für den jeweiligen Anwendungsfall relevanten Qualitätsmerkmale gestatten. Neben den Spaltmessungssensoren können weitere Sensoren vorgesehen sein, die beispielsweise einen (Tiefen-)Abstand zwischen Karosserie 1 und Frontmodul 3 messen. Um einerseits eine möglichst hohe Unempfindlichkeit gegenüber Lackeffekten der Karosserie 1 zu erhalten und um andererseits auch auf den (transparenten) Kunststoff-Abdeckungen 28 der Scheinwerfermodule 11 verwertbare Messergebnisse zu erreichen, werden vorteilhafte Weise optische Sensoren im UV-Spektralbereich eingesetzt.

Das Montagewerkzeug 5 mit dem Sensorsystem 20 und mit dem in der Fixierzvorrichtung 19 gehaltenen („Master“-) Frontmodul 3' wird nun mit Hilfe des Roboters 14 auf die (durch das manuelle bzw. interaktive Ausrichten eingestellte, in der Darstellung der Figur 2b eingenommene) Montageposition 25 gegenüber der („Master“-) Karosserie 1' „eingelernt“. Hierbei werden zunächst Messwerte aller Sensoren 21 in der Montageposition 25 aufgenommen und als „Soll-Messwerte“ in einer Auswerteeinheit 29 des Sensorsystems 20 abgelegt; diese Sensor-Auswerteeinheit 29 ist zweckmäßigerweise in das Steuersystem 16 des Roboters 14 integriert. Anschließend wird - ausgehend von der Montageposition 25 - mit Hilfe des Roboters 14 die Lage des Montagewerkzeugs 5 und des darin gehaltenen („Mas-

ter“-) Frontmoduls 3' gegenüber der („Master“-) Karosserie 1' entlang bekannter Verfahrbahnen - wie in Figur 2b durch Pfeile 30 angedeutet - systematisch verändert; in der Regel sind dies Inkrementalbewegungen des Roboters 14 in seinen Freiheitsgraden. Die dabei auftretenden Veränderungen der Messwerte der Sensoren 21 werden (vollständig oder in Teilen) aufgezeichnet. Aus diesen Sensorinformationen wird - in bekannter Weise - eine sogenannte Jacobimatrix (Sensitivitätsmatrix) errechnet, die den Zusammenhang zwischen den Inkrementalbewegungen des Roboters 14 und den dabei auftretenden Änderungen der Sensormesswerte beschreibt. Das Verfahren zur Ermittlung der Jacobimatrix ist beispielsweise beschrieben in „A tutorial on visual servo control“ von S. Hutchinson, G. Hager und P. Corke, IEEE Transactions on Robotics and Automation 12(5), Oktober 1996, Seiten 651–670. In diesem Artikel sind auch die Anforderungen an die Verfahrwege bzw. die Messumgebungen beschrieben (Stetigkeit, Monotonie, ...), die erfüllt sein müssen, um eine gültige Jacobimatrix zu erhalten. - Die Inkrementalbewegungen sind in einer solchen Weise ausgewählt, dass während dieses Einrichtvorgangs keine Kollisionen des Montagewerkzeugs 5 bzw. des („Master“-) Frontmoduls 3' mit der („Master“-) Karosserie 1' auftreten können.

Die in der Einrichphase erzeugte Jacobimatrix wird zusammen mit den „Soll-Messwerten“ in der Auswerteeinheit 29 des Sensorsystems 20 abgelegt; diese Daten bilden die Grundlage für den späteren Positionier-Regelvorgang A-2 in der Arbeitsphase (siehe unten unter II.).

Weiterhin wird in der Einrichphase eine Verfahrbahn 23 der Roboterhand 17 (und somit des Montagewerkzeugs 5) generiert, die in der späteren Arbeitsphase II. gesteuert durchlaufen wird. Diese Verfahrbahn 23 ist schematisch in Figur 4 dargestellt. Den Ausgangspunkt der Verfahrbahn 23 bildet eine sogenannte „Rückzugsposition“ 31, die so gewählt ist, dass eine neue Karosserie 1 in den Arbeitsraum 24 des Roboters 14 eingeführt werden kann, ohne dass Kollisionen der Karosserie 1

mit dem Montagewerkzeug 5 oder dem darin gehaltenen Frontmodul 3 zu befürchten sind. Diese Rückzugsposition 31 kann beispielsweise einer Entnahmestation 32 entsprechen, in der das Montagewerkzeug 5 ein zu verbauendes Frontmodul 3 aus einem Werkstückträger 33 oder von einem Transportband entnimmt (siehe Figur 3). Ausgehend von dieser Rückzugsposition 31 umfasst die Verfahrbahn 23 folgende separate Abschnitte:

- A-1 Das Montagewerkzeug 5 mit eingelegtem Frontmodul 3 wird auf einer gesteuert zu durchlaufenden Bahn A-1 von der Rückzugsposition 31 in eine fest vorgegebene, sogenannte „Näherungsposition“ 34 gebracht, die so gewählt ist, dass alle Einzelsensoren 21 des Sensorsystems 20 gültige Messwerte des jeweiligen Bereiches 12,13,26,27,9,28 des Frontmoduls 3 und/oder der Karosserie 1 erfassen können, während gleichzeitig gewährleistet ist, dass keine Kollisionen des Montagewerkzeugs 5 oder dem Frontmodul 3 mit der Karosserie 1 auftreten können.
- A-2 Das Montagewerkzeug 5 mit eingelegtem Frontmodul 3 wird auf einer geregt zu durchlaufenden Bahn A-2 von der Näherungsposition 34 in die (wie oben beschrieben „eingelernte“) Montageposition 25 gebracht, in der das im Montagewerkzeug 5 gehaltene Frontmodul 3 lage- und winkelgenau gegenüber dem Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 ausgerichtet ist. Was während dieses geregt zu durchlaufenden Prozessschritts im einzelnen geschieht, wird weiter unten (in II. Arbeitsphase) beschrieben.
- F Die Fixiervorrichtung 19 wird gelöst, und das Montagewerkzeug 5 wird robotergesteuert in die Rückzugsposition 31 zurückbewegt.

Die im Rahmen der Einrichphase erzeugte Verfahrbahn 23 des Montagewerkzeugs 5 besteht somit aus zwei Abschnitten A-1 und F, die in der späteren Arbeitsphase gesteuert durchlaufen werden, sowie einem in der späteren Arbeitsphase geregt zu durchlaufenden Abschnitt A-2. Die Schritte A-1 und F können während der Einlernphase des Montagewerkzeugs 5 interaktiv

eingegeben werden, oder sie können in Form eines (ggf. off-line generierten) Programms im Steuersystem 16 des Roboters 14 abgelegt werden.

## II. Arbeitsphase

In der Arbeitsphase werden sequentiell (beispielsweise auf einem Förderband) Karosserien 1 in den Arbeitsraum 24 des Montagesystems 4 zugeführt, dort für die Dauer des Montagevorgangs aus der Fördertechnik ausgehoben, und mit Hilfe des Montagesystems 4 - unter Verwendung der in der Einrichphase eingelernten Verfahrbahn - mit lagegenau montierten Frontmodulen 3 versehen (siehe Figur 3).

### Verfahrbahn-Abschnitt A-1 (Näherungsphase) :

Während des Zuführens der neuen Karosserie 1 befindet sich das Montagewerkzeug 5 in der Rückzugsposition 31 und nimmt dort aus der Entnahmestation 32 ein zu montierendes Frontmodul 3 auf; dies ist in Figur 3 gestrichelt dargestellt. Die Aufnahme des Frontmoduls 3 kann - wie beispielsweise in der (*PCT-Patentanmeldung ..., unsere Akte P803860/WO/1*) beschrieben, durch einen geregelten Prozess mit Hilfe einer Messsensorik erfolgen, so dass eine definierte Lage des Frontmoduls 3 in der Fixiervorrichtung 19 gewährleistet ist. Vorteilhaft erweise wird dann beim Aufnehmen des Frontmoduls 3 aus dem Werkstückträger 33 das Sensorsystem 20 des Montagewerkzeugs 5 verwendet, das auf die Bereiche 26,27,28 des Frontmoduls 3 ausgerichtet ist und daher geeignete Messwerte für einen geregelten Positionierungsvorgang des Montagewerkzeugs 5 gegenüber dem Frontmodul 3 liefert. - Allerdings kann das Frontmodul 3 ebensogut „ungenau“ in der Fixiervorrichtung 19 aufgenommen werden, weil - wie im folgenden bei der Beschreibung des Verfahrbahn-Abschnitts A-2 dargelegt wird - bei der Ausrichtung des Frontmoduls 3 gegenüber der Karosserie 1 jegliche Unge-

nauigkeiten des Frontmoduls 3 bezüglich seiner Lage in der Fixiervorrichtung 19 ausgeregelt werden.

Sobald die neue Karosserie 1 in den Arbeitsraum 24 hineinbewegt und dort fixiert worden ist, wird das Montagewerkzeug 5 mit (lagegenau oder ungenau) eingelegtem Frontmodul 3 gesteuert in die Näherungsposition 34 der Figur 2a bewegt.

Verfahrbahn-Abschnitt A-2 (Positionierphase des Montagewerkzeugs 5) :

Ausgehend von der Näherungsposition 34 wird eine Positionierphase (Bahnabschnitt A-2 in Figur 4) des Montagewerkzeugs 5 durchlaufen, im Rahmen derer das im Montagewerkzeug 5 gehaltene Frontmodul 3 in die (während der Einlernphase eingelernte) Montageposition 25 gegenüber der Karosserie 1 gebracht und dabei lagegenau gegenüber dem Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 ausgerichtet wird. Hierzu werden durch die Sensoren 21 des Sensorsystems 20 Messwerte in ausgewählten Bereichen 12,13,26,27,9,28 des Frontmoduls 3 und der Karosserie 1 aufgenommen. Mit Hilfe dieser Messwerte und der in der Einrichphase bestimmten Jacobimatrix wird ein Bewegungssinkrement (Verschiebungsvektor) berechnet, das die Differenz zwischen den aktuellen (Ist-) Sensormesswerten und den (Soll-) Sensormesswerten verkleinert. Das im Montagewerkzeug 5 gehaltene Frontmodul 3 wird dann mit Hilfe des Roboters 14 um dieses Bewegungssinkrement verschoben und/oder geschwenkt, und während der laufenden Bewegung werden neue (Ist-) Sensormesswerte aufgenommen.

Dieser iterative Mess- und Verschiebe-Vorgang wird in einer Regelschleife so lange wiederholt, bis die Differenz zwischen den aktuellen (Ist-) und den angestrebten (Soll-) Sensormesswerten ein vorgegebenes Fehlermaß unterschreitet, oder bis sich diese Differenz nicht mehr über einen im Vorfeld festgesetzten Schwellenwert hinaus ändert. Das Frontmodul 3 befin-

det sich nun (im Rahmen der durch Fehlermaß bzw. Schwellenwert vorgegebenen Genauigkeit) in der (in Figur 2b dargestellten) Montageposition 25 gegenüber der Karosserie 1.

Durch die in dieser Positionierphase A-2 durchlaufene iterative Minimierung werden sowohl Ungenauigkeiten der Karosserie 1 bezüglich ihrer Lage und Ausrichtung im Arbeitsraum 24 des Roboters 14 als auch eventuell vorhandene Formfehler des Frontbereichs 2 der Karosserie 1 (d.h. Abweichungen von der („Master“) Karosserie 1') kompensiert. Simultan werden Ungenauigkeiten des Frontmoduls 3 bezüglich seiner Lage und Ausrichtung im Montagewerkzeug 5 und eventuell vorhandene Formfehler des Frontmoduls 3 kompensiert (d.h. Abweichungen vom („Master“) Frontmodul 3'). Das Frontmodul 3 wird also im Zuge dieses iterativen Regelprozesses - unabhängig von Form- und Lageungenauigkeiten - in der „optimalen“ Weise in den Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 eingepasst. Zur separaten Erkennung und Bewertung von Formfehlern des Frontmoduls 3 und der Karosserie 1 können auf dem Montagewerkzeug 5 zusätzliche (d.h. für die eigentliche Positionieraufgabe nicht benötigte) Sensoren vorgesehen werden, deren Messwerte ausschließlich oder teilweise zur Erfassung der Formfehler verwendet werden. Weiterhin können die Messwerte der Einzelsensoren 21 mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren versehen werden, um eine gewichtete Lageoptimierung des Frontmoduls 3 gegenüber dem Frontausschnitt 2 der Karosserie 1 herbeizuführen.

Eine wichtige Eigenschaft der Positionierphase A-2 ist ihre Unabhängigkeit von der Robotergenauigkeit: Da der Positionierungsvorgang auf einem iterativen Vergleich der (Ist-) Messwerte mit (Soll-) Messwerten beruht, wird jede Positionsunge nauigkeit des Roboters 14 sofort durch den iterativen Regelprozess kompensiert.

Arbeitsgang E (Befestigung des Frontmoduls 3 an der Karosserie 1)

In der nun eingenommenen Montageposition 25 des Montagewerkzeugs 5, in der das Frontmodul 3 optimal gegenüber dem Frontausschnitt 2 positioniert ist, erfolgt die Befestigung des Frontmoduls 3 an der Karosserie 1. Hierfür kommen beispielsweise (in Figur 3 angedeutete) separate Roboter 35 zum Einsatz, an denen Schraubwerkzeuge befestigt sind.

Verfahrbahn-Abschnitt F (Rückzug des Montagewerkzeugs 5) :

Nach dem Montieren des Frontmoduls 3 wird die Fixiervorrichtung 19 des Montagewerkzeugs 5 gelöst, so dass das Frontmodul 3 frei an der Karosserie 1 hängt. In dieser Lage können ggf. (mit Hilfe der Sensoren 21) Kontrollmessungen der Fugenmaße, Spalte und Tiefenmaße in den Bereichen 12,13,26,27,9,28 durchgeführt werden; sollten dabei Abweichungen von den Sollmaßen festgestellt werden, so wird dem Bediener der Anlage eine definierte Information zur Nacharbeit zugesandt.

Anschließend wird die Fixiervorrichtung 19 des Montagewerkzeugs 5 in einer solchen Weise aus der Eingriffsposition herausbewegt, dass das Montagewerkzeug 5 kollisionsfrei roboter gesteuert aus der Montageposition 25 in die Rückzugsposition 31 zurückbewegt werden kann. Die Karosserie 1 wird entspannt, ausgehoben und gefördert. Parallel bzw. anschließend wird das Montagewerkzeug 5 mit einem neuen Frontmodul 3 bestückt, und eine neue Karosserie 1 wird dem Arbeitsraum 24 des Montagesystems 4 zugeführt.

Bisher wurde angenommen, dass das Frontmodul 3 fertigungsbedingte Toleranzen aufweisen und/oder lagegenau im Montagewerkzeug 5 aufgenommen sein kann, weswegen zur Einpassung des Frontmoduls 1 im Rahmen der Positionierphase A-2 Messwerte sowohl auf den (für die Einpassqualität relevanten) Randbereichen 22,26,27 des Frontmoduls 3 als auch auf den Nachbarbereichen 12,13 der Karosserie 1 verwendet wurden. - Eine an-

dere Einpassstrategie ist möglich, falls die Lage des Frontmoduls 3 im Fixierwerkzeug 19 mit hoher Reproduzierbarkeit bekannt ist, und falls das Frontmodul 3 toleranzfrei ist (bzw. als toleranzfrei angenommen werden kann). In diesem Fall, in dem eine hochgenaue Ausrichtung des Frontmoduls im Montagewerkzeug 5 gegeben ist, brauchen zur Einpassung des Frontmoduls 3 im Rahmen der Positionierphase A-2 keine Messwerte auf den Randbereichen 22,26,27 des Frontmoduls 3 mehr aufgenommen zu werden; in diesem Fall genügt es, den Regelprozess während der Positionierphase anhand von Messwerten von Sensoren durchzuführen, die auf die Nachbarbereiche 12,13,9 der Karosserie 1 gerichtet sind.

Zur Datenkommunikation zwischen den unterschiedlichen Systemkomponenten (Auswerteeinheit 29 des Sensorsystems 20 und der Steuereinheit 16 der Roboters 14) wird in den vorliegenden Ausführungsbeispielen vorteilhafterweise eine TCP/IP-Schnittstelle eingesetzt, die eine hohe Datenrate ermöglicht. Eine solche hohe Datenrate ist notwendig, um während der geregelt zu durchlaufenden Positionierphase A-2 eine Regelung des Gesamtsystems (Sensorsysteme/Roboter) mit der Vielzahl der Einzelsensoren 21 im Interpolationstakt des Roboters 14 (typischerweise 12 Millisekunden) bewältigen zu können. Für Regelungsprobleme geringerer Komplexität - d.h. bei niedrigeren Anforderungen an die Genauigkeit und längeren Regelzeiten - kann die Regelung auch über eine konventionelle serielle Schnittstelle realisiert werden.

In der Arbeitsphase II. sollte während der Positionierphase A-2 sichergestellt sein, dass keine Berührungskontakte zwischen dem Frontmodul 3 und der Karosserie 1 auftreten; solche Berührungskontakte gehen nämlich einher mit Reibungskräften, die die Positionsregelung des Frontmoduls erheblich beeinträchtigen können. Solche störenden Berührungskontakte können beispielsweise dann auftreten, wenn die Karosserie 1 zu ungenau im Arbeitsraum 24 des Roboters 14 positioniert wurde oder wenn die Längsträgerkonsolen zu große Toleranzen aufweisen.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel müssen während der Regelphase insbesondere Berührungskontakte mit den (in den Figuren nicht abgebildeten) Längsträgerkonsolen der Karosserie 1 vermieden werden, an die das Frontmodul 3 im Arbeitsgang E angeschraubt wird und die senkrecht zur Fahrzeuglängsrichtung ausgerichtet sind. - Um diese Berührungskontakte zu vermeiden, wird die Näherungsphase A-1 vorteilhafterweise in einer solchen Weise gestaltet (bzw. die Näherungsposition 34 in einer solchen Weise angefahren), dass während der darauffolgenden Positionierphase A-2 keine Berührungen des Frontmoduls 3 zu den Längsträgerkonsolen auftreten können:

- Beispielsweise kann das Sensorsystem 20 mit (in den Figuren nicht gezeigten) zusätzlichen (Abstands-)Sensoren versehen sein, die den Abstand des Frontmoduls 3 gegenüber den Längsträgerkonsolen messen. Das Anfahren der Näherungsposition 34 erfolgt geregelt, mit den Messwerten der Abstandssensoren als Regelgröße; die Näherungsposition 34 ist dann erreicht, wenn der Abstand in Fahrzeuglängsrichtung zwischen dem Frontmodul 3 und den Längsträgerkonsolen ein vorgegebenes Maß hat (z.B. 2 mm). Ausgehend von dieser Näherungsposition 34 wird in der nun folgenden Positionierphase A-2 unter Verwendung der Spaltsensoren 21 das Frontmodul 3 in einer Ebene senkrecht zur Fahrzeuglängsrichtung so lange verschoben und gedreht, bis die optimalen Maße für den Spalt 15 erreicht sind.
- Alternativ kann das Frontmodul 3 im Rahmen der Näherungsphase A-1 zunächst aktiv in Berührungs kontakt mit den Längsträgerkonsolen gebracht werden, wobei diese Kontakt situation mit Hilfe Kraft-Momenten-Sensoren detektiert wird, die z.B. zwischen Montagewerkzeug 5 und Roboterhand 17 eingebaut sind. Ausgehend von dieser Kontakt situation wird das Frontmodul 3 dann um einen bestimmten Abstand (z.B. 2 mm) von den Längsträgerkonsolen abgehoben. Diese Lage definiert die Näherungsposition 34 und bildet den Ausgangspunkt für die Positionierphase A-2, im Rahmen derer das Frontmodul 3 in den übrigen Freiheitsgraden gegen-

über den umgebenden Karosseriebereichen 12,13 ausgerichtet wird.

- Alternativ kann das Montagewerkzeug 5 während der Näherungsphase A-1 schwimmend auf der Roboterhand 17 gelagert sein. Das schwimmend gelagerte Montagewerkzeug 5 wird mit dem darin gehaltenen Frontmodul 3 so weit an die Karosserie 1 angenähert, bis das Frontmodul 3 in Berührungs kontakt zu allen Längsträgerkonsolen steht; in dieser Ausrichtung wird die Winkellage des Montagewerkzeugs 5 gegenüber der Roboterhand 17 fixiert, indem die schwimmende Lagerung geklemmt wird. Anschließend wird das Montagewerkzeug 5 durch den Roboter 14 definiert um ein bestimmtes Maß (z.B. 2 mm) in Fahrzeulgängsrichtung von der Karosserie 1 entfernt, so dass die Kontakt situation zwischen Frontmodul 3 und Längsträgerkonsolen aufgelöst ist. Dies definiert die Näherungsposition 34 und bildet den Ausgangspunkt für die nun folgenden Positionierphase A-2.

Generell gesprochen werden die Berührungskontakte in der Positionierphase A-2 unterbunden, indem im Rahmen der Näherungsphase A-1 die Lage des Frontmoduls 3 gegenüber der Karosserie 1 in einigen Freiheitsgraden (hier: in Fahrzeulgängsrichtung) positioniert und fixiert wird, während in der Positionierphase A-2 nur eine Optimierung der Frontmodullage in den übrigen Freiheitsgraden (hier: senkrecht zur Fahrzeulgängsrichtung) erfolgt. Nachdem Abschluss der Positionierphase A-2 wird zu Beginn des Arbeitsgangs E die Kontakt situation zwischen Frontmodul 3 und Karosserie 1 wieder hergestellt, so dass die Verschraubung des Frontmoduls 3 mit den Längsträgerkonsolen erfolgen kann.

Figuren 5a und 5b zeigen als weiteren Anwendungsfall des erfindungsgemäßen Montageverfahrens eine schematische Darstellung der Montage eines Dachmoduls 3" in einen Dachausschnitt 2" einer Karosserie 1", wobei das Dachmodul 3" in den Dachausschnitt 2" eingeklebt werden soll. Die Bezugszeichen der beteiligten Bauteile und Komponenten in Figuren 5a und 5b entsprechen den Bezugszeichen des Ausführungsbeispiels der

Figuren 1 bis 3, sind jedoch zur Unterscheidung jeweils mit einem Doppelstrich ("") gekennzeichnet. Das Dachmodul 3" wird der Karosserie 1" in einem robotergesteuerten Montagewerkzeug 5" zugeführt, das mit einem Sensorsystem 20" versehen ist. Die Sensoren 21" sind dabei vorzugsweise Spaltsensoren, die die Breite und Tiefe eines Spalts 15" zwischen Dachmodul 3" und umgebendem Dachrahmen 9",10" messen. Sie sind auf diejenigen Referenzbereiche 12",13",22" auf Dachmodul 3" bzw. Dachrahmen 9",10" gerichtet, die für die Ausrichtung des Dachmoduls 3" gegenüber dem Dachrahmen 9",10" von besonders hoher Bedeutung sind. Die Fixiervorrichtung 19" wird in diesem Fall durch Unterdruck-Saugnäpfe gebildet, die an der Oberseite 36 des Dachmoduls 3" angreifen.

Die Einlernphase I des Montagesystems 4" erfolgt analog zu der oben beschriebenen Einlernphase des Frontmodul-Montagesystems 4. Da allerdings das Dachmodul 3" mit Hilfe eines Klebeverfahrens mit der Karosserie 1" verbunden werden soll, muss auf einen Fügebereich 37 des Dachmoduls 3" bzw. des Dachausschnitts 2" eine Klebstoffftraupe 38 aufgetragen werden, bevor das Dachmodul 3" endgültig mit der Karosserie 1" verbunden wird. Daher muss die Verfahrbahn 23" die folgenden zusätzlichen Verfahrensschritte enthalten, die zwischen der (geregelt zu durchlaufenden) Positionierphase A-2 und der eigentlichen Montage (d.h. dem endgültigen Verbinden des Dachmoduls 3" mit der Fahrzeugkarosserie 1") durchlaufen werden müssen (siehe die gestrichelt eingezeichneten Verfahrbahn-Abschnitte B,D in Figur 4):

Verfahrbahn-Abschnitt B (Ausweichphase des Montagewerkzeugs 5"):

Ausgehend von der in Verfahrbahn-Abschnitt A-2 geregelt angefahrenen Montageposition 25", die in Figur 5a dargestellt ist, wird das Montagewerkzeug 5" mit dem darin gehaltenen Dachmodul 3" vom Roboter 14" gesteuert in eine Ausweichposition 39 transportiert, die außerhalb eines im Dachbereich der

Karosserie 1" gelegenen Montagebereiches 40 liegt (siehe Figur 5b). Vor dem eigentlichen Anfahren der Ausweichposition 39 kann die im Rahmen des Regelvorgangs der Positionierphase A-2 erfolgte Lage- und Winkelverschiebung des im Montagewerkzeug 5" gehaltenen Dachmoduls 3" (entsprechend der Verschiebung zwischen der Näherungsposition 34" und der Montageposition 25") in Form einer sogenannten Nullpunktskorrektur an das Steuersystem des Roboters 14" weitergegeben werden. Das Steuersystem des Roboters 14" „kennt“ somit die (der Montageposition 25" entsprechende) Ausgangslage, die der Optimaleinpassung des Dachmoduls 3" in den Dachausschnitt 2" entspricht und kann diese an weitere an der Montage beteiligte Werkzeuge, beispielsweise an einen Klebroboter 41, weitergeben.

Durch das gesteuerte Wegbewegen des Dachmoduls 3" in die Ausweichposition 39 wird im Montagebereich 40 des Dachausschnitts 2" Platz geschaffen für ein robotergeführtes Klebwerkzeug 42, das im Fügebereich 37 auf dem Dachausschnitt 2" eine Klebstoffraupe 38 aufträgt und sich anschließend wieder aus dem Montagebereich 40 zurückzieht (Prozessschritt C). Dadurch wird der Raum des Dachausschnitts 2" wieder frei für das Montagewerkzeug 5".

Verfahrbahn-Abschnitt D (Rückbewegung des Montagewerkzeugs 5"):

Das Montagewerkzeug 5" mit dem Dachmodul 3" wird nun robotergesteuert aus der Ausweichposition 39 in die Montageposition 25" zurückbewegt, wodurch das Dachmodul 3" wieder lage- und winkelgenau gegenüber dem Dachausschnitt 2" der Karosserie 1" zu liegen kommt und in diesem Zustand durch die Klebstoffraupe 38 mit dem Dachausschnitt 2" verbunden wird. Diese Bahn D kann insbesondere die „Umkehr“ der Bahn B sein. Das Dachmodul 3" ist somit in der gewünschten Lage und Ausrichtung mit dem Dachausschnitt 2" der Karosserie 1" verklebt.

Der Arbeitsgang E, der im vorhergehenden Ausführungsbeispiel der (mechanischen) Montage des Frontmoduls 3 an der Karosserie 1 entsprach, entfällt in diesem Fall. Analog zur Frontmodulmontage wird nun im folgenden Bahnabschnitt F die Fixiervorrichtung (Saugnäpfe 19") des Montagewerkzeugs 5" gelöst und das Dachmodul 3" somit freigegeben; anschließend wird das Montagewerkzeug 5" in die Rückzugsposition 31" zurückbewegt, die Karosserie 1" aus dem Arbeitsbereich des Roboters 14" entfernt und eine neue zu bearbeitende Karosserie zugeführt.

Das Verfahren ist - neben der Frontmodul- und Dachmodulmontage in Fahrzeugkarosserien - auf beliebige andere Montageumfänge übertragbar, bei denen mit Hilfe eines robotergeführten Montagewerkzeugs 4,4" ein Anbauteil 3,3" lagegenau an einem Werkstück 1,1", insbesondere einer Karosserie, montiert werden soll. Unter „robotergeführten“ Werkzeugen sind im Zusammenhang der vorliegenden Anmeldung ganz allgemein Werkzeuge zu verstehen, die auf einem mehrachsigen Manipulator, insbesondere einem sechsachsigen Industrieroboter 14,14" montiert sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Montage eines Anbauteils (3,3") an ein Werkstück (1,1"), insbesondere an eine Fahrzeugkarosserie, wobei das Anbauteil (3,3") lagegenau gegenüber einem Referenzbereich (12,13,12",13") auf dem Werkstück (1,1") montiert wird,
  - bei welchem Verfahren ein mittels eines Roboters (14,14") geführtes Montagewerkzeug (5,5") verwendet wird, welches eine Fixiervorrichtung (19,19") zur Aufnahme des Anbauteils (3,3") und ein fest mit dem Montagewerkzeug (5,5") verbundenes Sensorsystem (20,20") mit mindestens einem Sensor (21,21") umfasst,
  - wobei das Montagewerkzeug (5,5") mit dem in der Fixiervorrichtung (19,19") gehaltenen Anbauteil (3,3") zunächst im Rahmen einer Positionierphase (A-2) ausgehend von einer Näherungsposition (34,34"), welche unabhängig von der Lage des Werkstücks (1,1") im Arbeitsraum (24) des Roboters (14,14") ist, in eine Montageposition (25,25") bewegt wird, in welcher das im Montagewerkzeug (5,5") gehaltene Anbauteil (3,3") lagegenau gegenüber dem Referenzbereich (12,13,12",13") des Werkstücks (1,1") ausgerichtet ist
  - und wobei das Anbauteil (3,3") dann in dieser Montageposition (25,25") des Montagewerkzeugs (5,5") mit dem Werkstück (1,1") verbunden wird,  
dadurch gekennzeichnet, dass zum Anfahren der Montageposition (25,25") ein iterativer Regelvorgang durchlaufen wird, im Zuge dessen
    - ein (Ist-)Messwert des mindestens einen Sensors (21,21") erzeugt wird,
    - dieser (Ist-)Messwert mit einem im Rahmen einer Einstellphase erzeugten (Soll-)Messwert verglichen wird,

- aus der Differenz zwischen (Ist-)Messwert und (Soll-)Messwert unter Verwendung einer im Rahmen der Einrichungsphase berechneten Jacobi-Matrix ein Verschiebungsvektor des Montagewerkzeugs (5,5") berechnet wird,
- das Montagewerkzeug (5,5") um diesen Verschiebungsvektor verschoben wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der iterative Regelvorgang abgebrochen wird, wenn

- entweder die Abweichung zwischen (Soll-)Messwert und (Ist-)Messwert unterhalb eines vorgegebenen Schwellwerts liegt, oder
- die bei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten zu erreichende Reduktion dieser Abweichung unterhalb eines vorgegebenen Schwellwerts liegt.

3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass zur Kommunikation zwischen einer Steuervorrichtung (16) des Roboters (14,14") und einer Auswerteeinheit (29) des Sensorsystems (20,20") eine TCP/IP-Schnittstelle verwendet wird.

4. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet,  
dass das Verfahren zur Montage eines Frontmoduls (3) in einen Frontausschnitt (1) einer Fahrzeugkarosserie (2) verwendet wird.

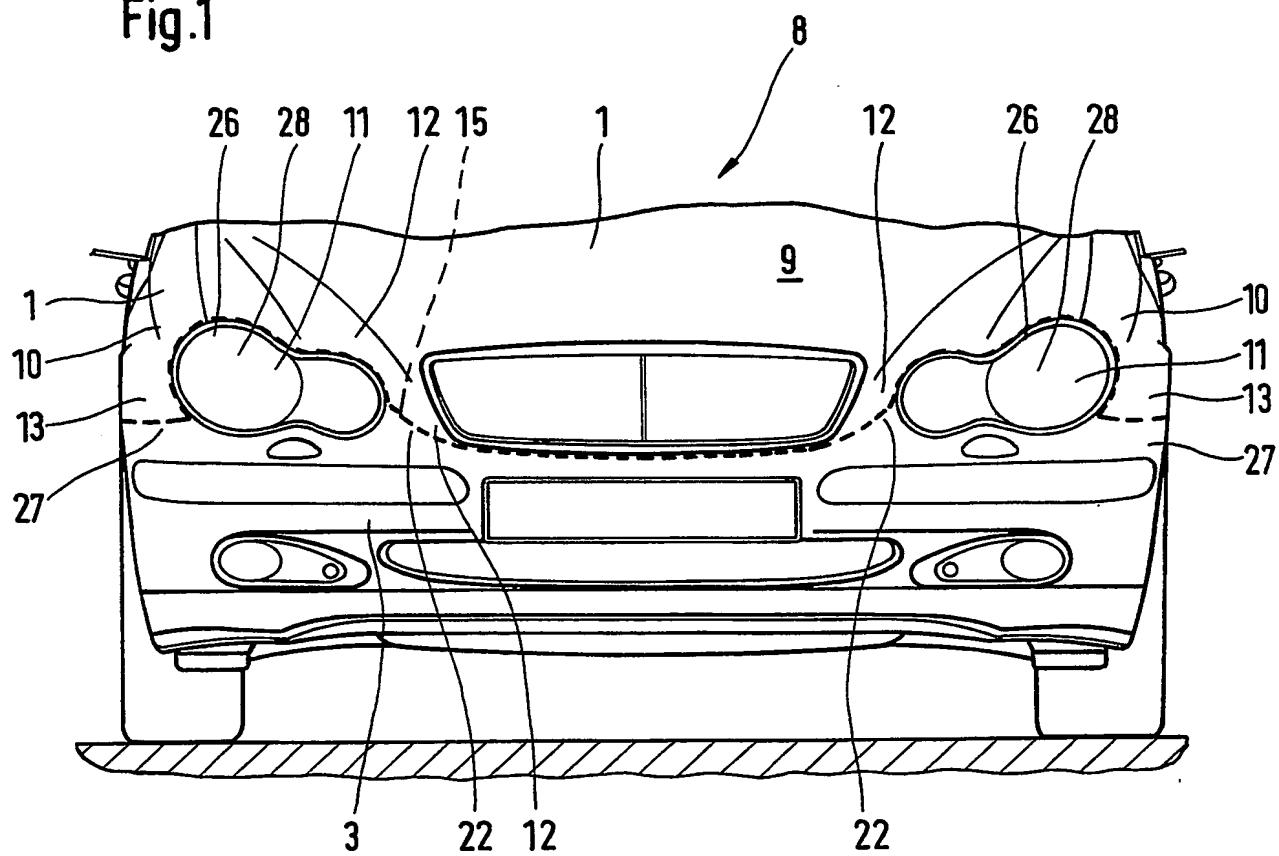
5. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet,  
dass das Verfahren zur Montage eines Dachmoduls (3") in einen Dachausschnitt (2") einer Fahrzeugkarosserie (1") verwendet wird.

6. Montagesystem (4,4") zur Montage eines Anbauteils (3,3") an ein Werkstück (1,1"), insbesondere an eine Fahrzeugkarosserie,
  - mit einem mit Hilfe eines Roboters (14,14") geführten Montagewerkzeug (5,5") ,
  - mit einem Sensorsystem (20,20") , welches fest mit dem Montagewerkzeug (5,5") verbunden ist und mindestens einen Sensor (21,21") umfasst,
  - mit einer Steuervorrichtung (16) zur Steuerung des Roboters (14,14") und des Montagewerkzeugs (5,5") ,
  - und mit einer Auswerteeinheit (29) zur Auswertung der Messwerte des Sensorsystems (20,20")  
dadurch gekennzeichnet,  
dass mindestens einer der Sensoren (21,21") ein metrisch unkalibrierter Sensor ist.
7. Montagesystem nach Anspruch 6,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der mindestens eine Sensor (21,21") ein optischer Spaltmesssensor ist.
8. Montagesystem nach Anspruch 6 oder 7,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der mindestens eine Sensor (21,21") ein berührungslos und flächenhaft messender Sensor ist, der zur Oberflächenerfassung Lichtstrahlung im UV-Bereich verwendet.

.000.

1 / 4

Fig.1



2 / 4

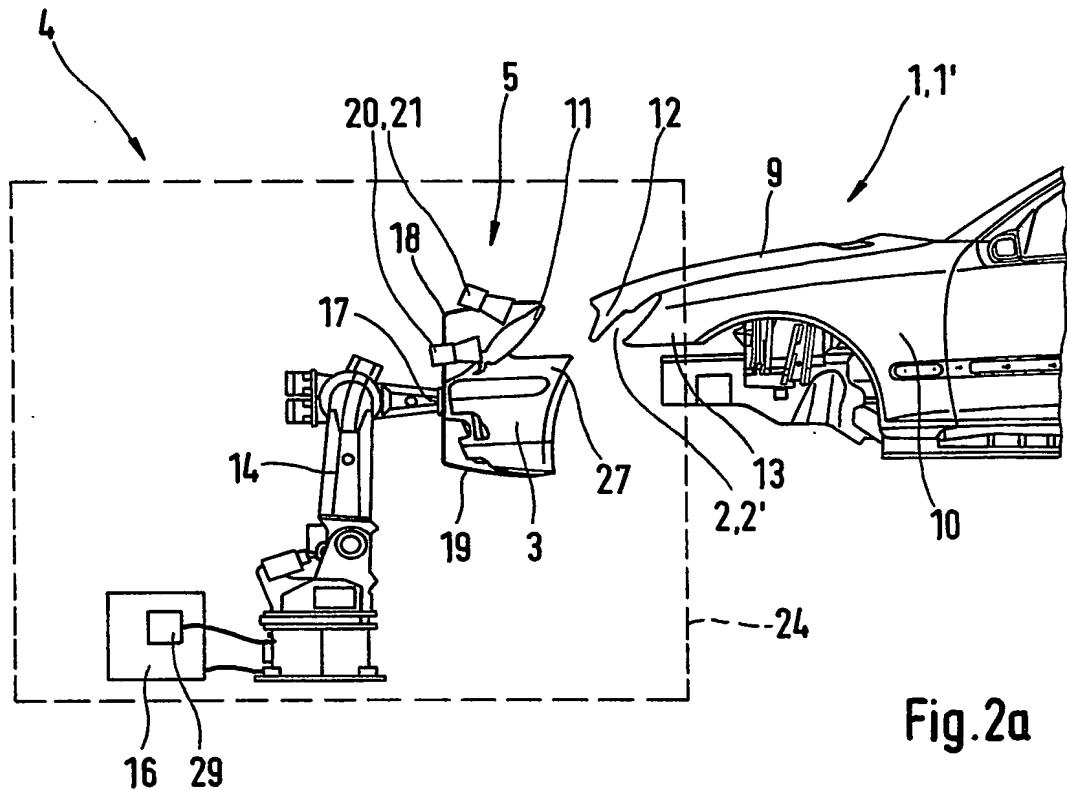


Fig. 2a

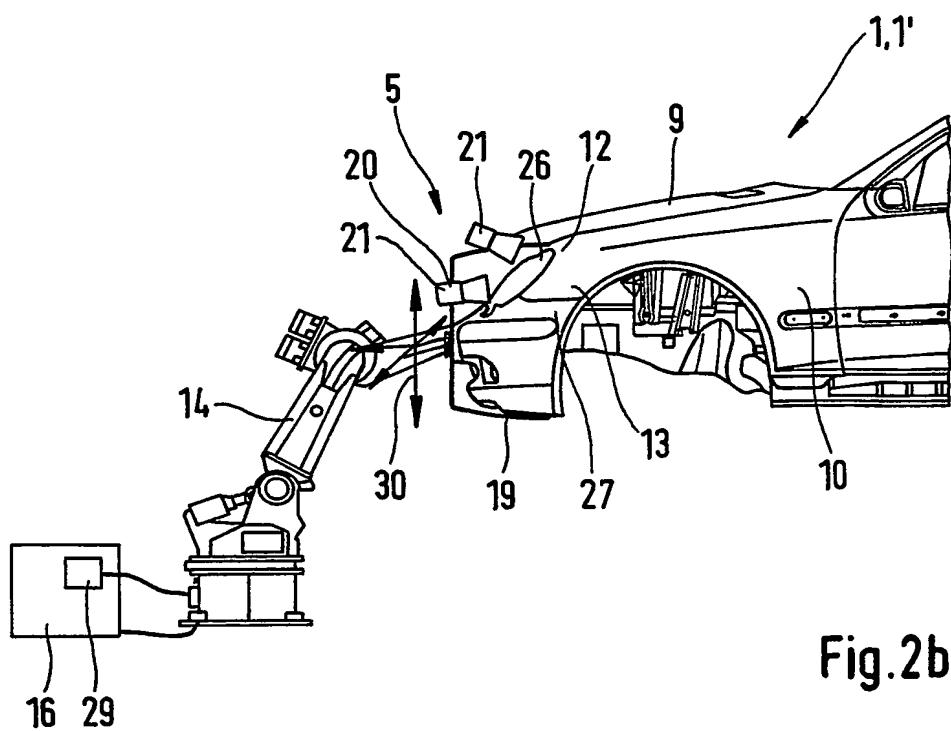


Fig. 2b

3 / 4

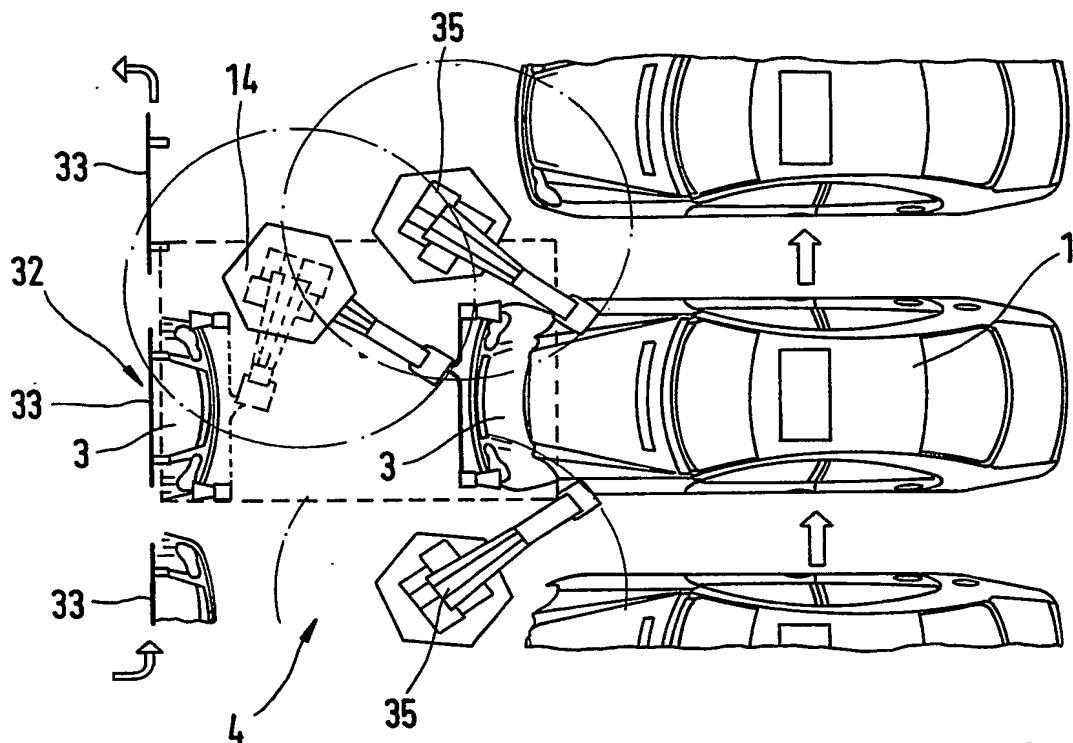


Fig. 3

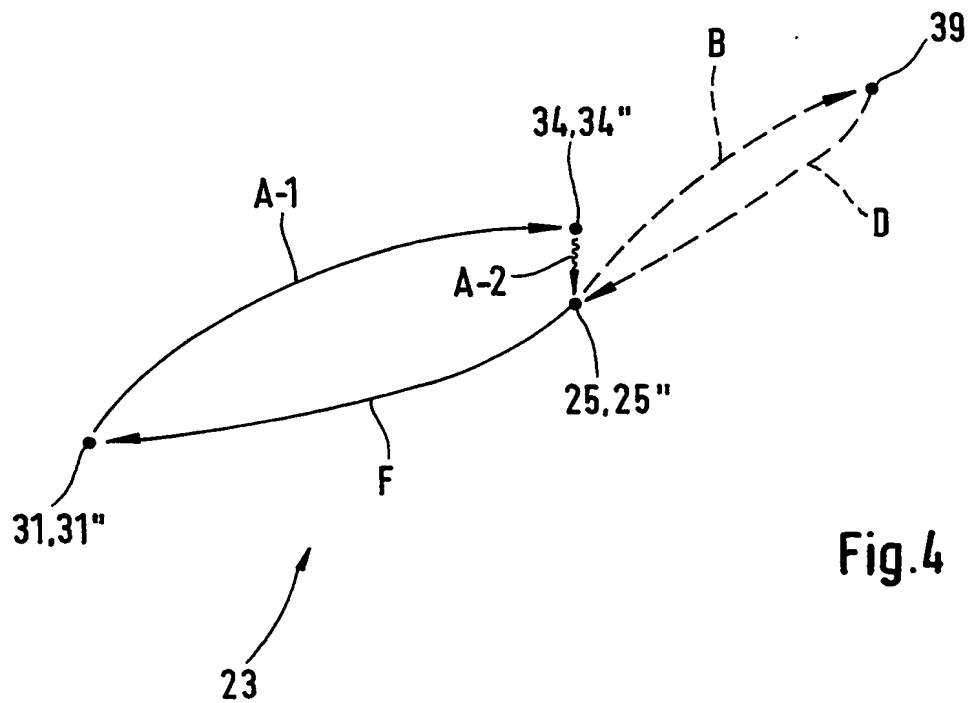


Fig. 4

ERSATZBLATT (REGEL 26)

4 / 4

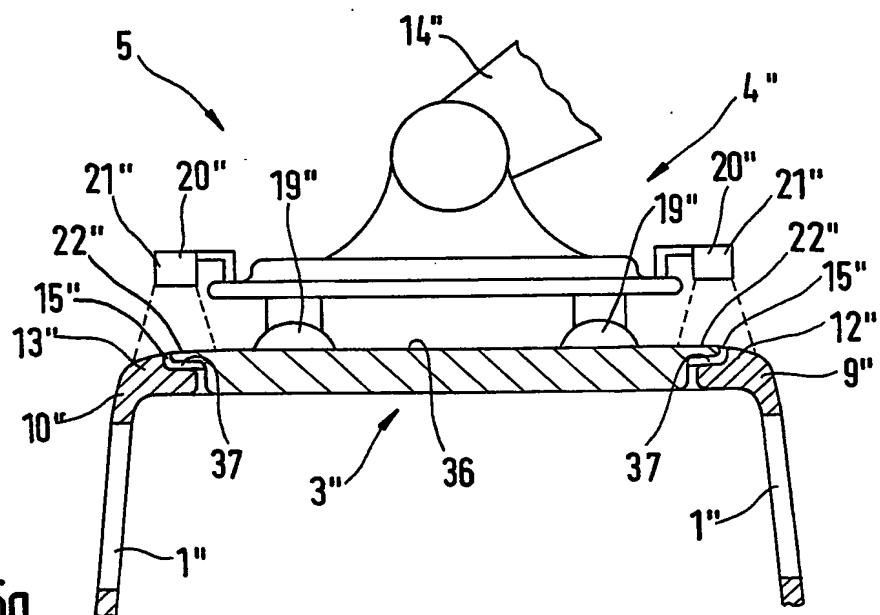


Fig. 5a

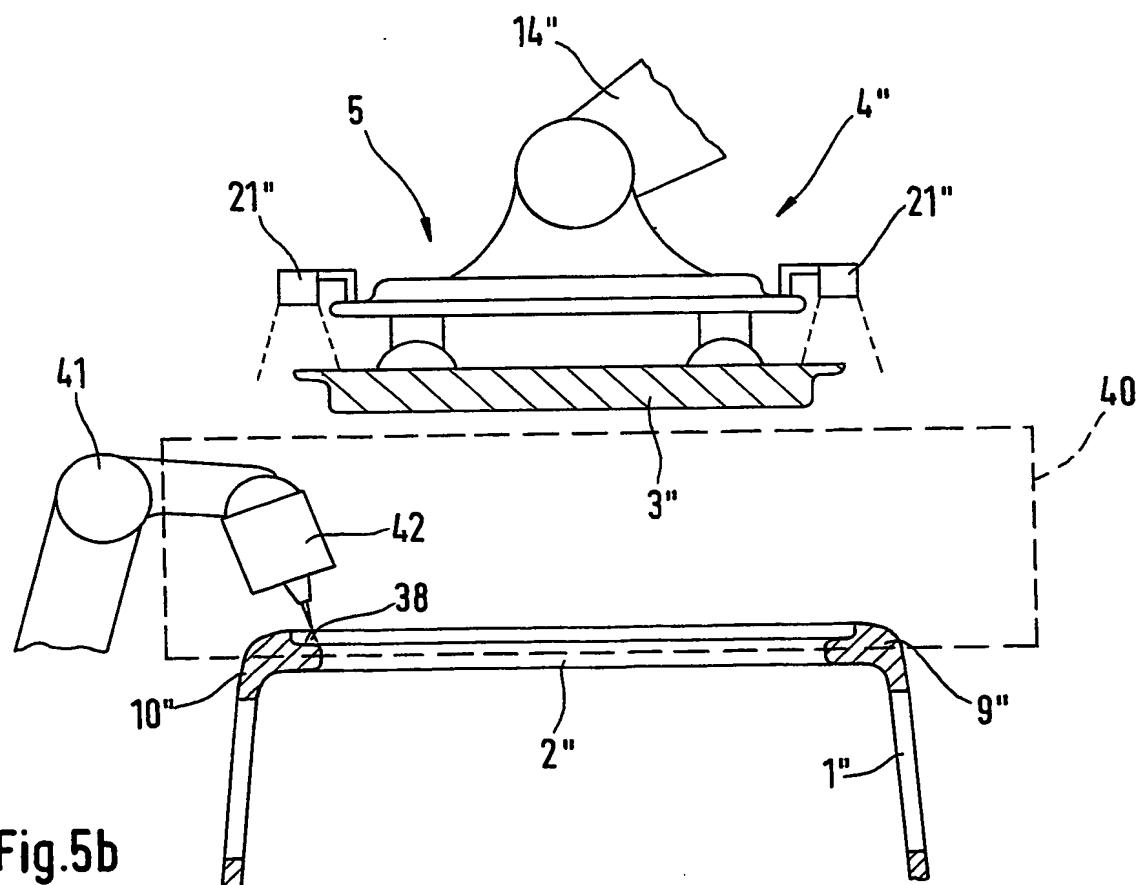


Fig. 5b

ERSATZBLATT (REGEL 26)